

80/551902

DOCKET NO.: 279101US6PCT

JC20 Rec'd PCT/PTO 05 OCT 2005

IN THE UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE

IN RE APPLICATION OF: Alain BALLAGNY, et al.

SERIAL NO.: NEW U.S. PCT APPLICATION

FILED: HEREWITH

INTERNATIONAL APPLICATION NO.: PCT/FR04/50148

INTERNATIONAL FILING DATE: April 7, 2004

FOR: SINGLE PLAITING NUCLEAR FUEL AND METHOD FOR THE PRODUCTION THEREOF

REQUEST FOR PRIORITY UNDER 35 U.S.C. 119  
AND THE INTERNATIONAL CONVENTION

Commissioner for Patents  
Alexandria, Virginia 22313

Sir:

In the matter of the above-identified application for patent, notice is hereby given that the applicant claims as priority:

<u>COUNTRY</u>	<u>APPLICATION NO</u>	<u>DAY/MONTH/YEAR</u>
France	03 04434	09 April 2003

Certified copies of the corresponding Convention application(s) were submitted to the International Bureau in PCT Application No. PCT/FR04/50148. Receipt of the certified copy(s) by the International Bureau in a timely manner under PCT Rule 17.1(a) has been acknowledged as evidenced by the attached PCT/IB/304.

Respectfully submitted,  
OBLON, SPIVAK, McCLELLAND,  
MAIER & NEUSTADT, P.C.



---

Gregory J. Maier  
Attorney of Record  
Registration No. 25,599  
Surinder Sachar  
Registration No. 34,423

Customer Number

22850

(703) 413-3000  
Fax No. (703) 413-2220  
(OSMMN 08/03)

BEST AVAILABLE COPY



PCT/FR 2004 / 050148

- 8 AVR. 2004

# BREVET D'INVENTION

## CERTIFICAT D'UTILITÉ - CERTIFICAT D'ADDITION

**COPIE OFFICIELLE**

REC'D	09 JUL 2004
WIPO	PCT

Le Directeur général de l'Institut national de la propriété industrielle certifie que le document ci-annexé est la copie certifiée conforme d'une demande de titre de propriété industrielle déposée à l'Institut.

Fait à Paris, le 30 MARS 2004

Pour le Directeur général de l'Institut  
national de la propriété industrielle  
Le Chef du Département des brevets

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Martine Planche'.

Martine PLANCHE

### DOCUMENT DE PRIORITÉ

PRÉSENTÉ OU TRANSMIS  
CONFORMÉMENT À LA  
RÈGLE 17.1.a) OU b)

INSTITUT  
NATIONAL DE  
LA PROPRIÉTÉ  
INDUSTRIELLE

SIEGE  
26 bis, rue de Saint Petersbourg  
75880 PARIS cedex 08  
Téléphone : 33 (0)1 53 04 53 04  
Télécopie : 33 (0)1 53 04 45 23  
[www.inpi.fr](http://www.inpi.fr)



INSTITUT  
NATIONAL DE  
LA PROPRIÉTÉ  
INDUSTRIELLE

26 bis, rue de Saint Pétersbourg  
75800 Paris Cedex 08  
Téléphone : 33 (1) 53 04 53 04

Téléphone : 33 (1) 53 04 53 04 Télécopie : 33 (1) 42 94 86 54

151 utpuli

**BREVET D'INVENTION  
CERTIFICAT D'UTILITÉ**

Code de la propriété intellectuelle - Livre VI



N° 11354 \*03

**REQUÊTE EN DÉLIVRANCE**

BR1

Cet imprimé est à remplir visuellement à l'encre noire.

DB 540 Q W / 210502

REPRISE DES PIÈCES		Réserve à l'INPI	Cet imprimé est à remplir lisiblement à l'encre noire	DB 540 o W / 210
DATE		9 AVRIL 2003		
LIEU		75 INPI PARIS B		
N° D'ENREGISTREMENT		0304434		
NATIONAL ATTRIBUÉ PAR L'INPI				
DATE DE DÉPÔT ATTRIBUÉE PAR L'INPI		09 AVR. 2003		
Vos références pour ce dossier (facultatif) b14331.3/ID BD1450				
Confirmation d'un dépôt par télécopie				
<input type="checkbox"/> N° attribué par l'INPI à la télécopie <b>2. NATURE DE LA DEMANDE</b> <input checked="" type="checkbox"/> Demande de brevet <input type="checkbox"/> Demande de certificat d'utilité <input type="checkbox"/> Demande divisionnaire <input type="checkbox"/> Demande de brevet initiale <i>ou demande de certificat d'utilité initiale</i> <input type="checkbox"/> Transformation d'une demande de brevet européen <i>Demande de brevet initiale</i> <input type="checkbox"/> N° Date _____ <input type="checkbox"/> N° Date _____ <input type="checkbox"/> N° Date _____				
<b>3. TITRE DE L'INVENTION</b> (200 caractères ou espaces maximum) <b>COMBUSTIBLE NUCLEAIRE A FILS TRESSES ET SON PROCEDE DE REALISATION</b>				
<b>4. DECLARATION DE PRIORITE</b> <b>OU REQUETE DU BENEFICE DE</b> <b>LA DATE DE DEPOT D'UNE</b> <b>DEMANDE ANTERIEURE FRANCAISE</b>		<input type="checkbox"/> Pays ou organisation Date _____ N° _____ <input type="checkbox"/> Pays ou organisation Date _____ N° _____ <input type="checkbox"/> Pays ou organisation Date _____ N° _____ <input type="checkbox"/> S'il y a d'autres priorités, cochez la case et utilisez l'imprimé «Suite»		
<b>5. DEMANDEUR</b> (Cochez l'une des 2 cases)		<input checked="" type="checkbox"/> Personne morale <input type="checkbox"/> Personne physique		
Nom ou dénomination sociale		COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE		
Prénoms				
Forme juridique		Etablissement de caractère Scientifique, Technique et Industriel		
N° SIREN		_____		
Code APE-NAF		_____		
Domicile ou siège	Rue	31-33 rue de la Fédération		
	Code postal et ville	75752 PARIS 15ème		
	Pays	FRANCE		
Nationalité		FRANCAISE		
N° de téléphone (facultatif)		N° de télécopie (facultatif) 0		
Adresse électronique (facultatif)				
<input type="checkbox"/> S'il y a plus d'un demandeur, cochez la case et utilisez l'imprimé «Suite»				

S'il y a plus d'un demandeur, cochez la case et utilisez l'imprimé «Suite»

Remplir impérativement la 2<sup>ème</sup> page

**BREVET D'INVENTION  
CERTIFICAT D'UTILITÉ**

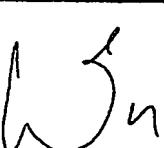
**REQUÊTE EN DÉLIVRANCE**

page 2/2

**BR2**

REMISE DES PIÈCES		Réervé à l'INPI
DATE		9 AVRIL 2003
LIEU		75 INPI PARIS B
N° D'ENREGISTREMENT		0304434
NATIONAL ATTRIBUÉ PAR L'INPI		

DB 540 W / 210502

<b>[6] MANDATAIRE (s'il y a lieu)</b>		
Nom		LEHU
Prénom		Jean
Cabinet ou Société		BREVATOMÉ 422.5/S002
N° de pouvoir permanent et/ou de lien contractuel		7068 du 12.06.98
Adresse	Rue	3, rue du Docteur Lancereaux
	Code postal et ville	75008 PARIS
	Pays	FRANCE
N° de téléphone (facultatif)		01 53 83 94 00
N° de télécopie (facultatif)		01 45 63 83 33
Adresse électronique (facultatif)		brevets.patents@brevalex.com
<b>[7] INVENTEUR (S)</b>		Les inventeurs sont nécessairement des personnes physiques
Les demandeurs et les inventeurs sont les mêmes personnes		<input type="checkbox"/> Oui <input checked="" type="checkbox"/> Non : Dans ce cas remplir le formulaire de Désignation d'inventeur(s)
<b>[8] RAPPORT DE RECHERCHE</b>		Uniquement pour une demande de brevet (y compris division et transformation)
Établissement immédiat ou établissement différé		<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Paiement échelonné de la redevance (en deux versements)		Uniquement pour les personnes physiques effectuant elles-mêmes leur propre dépôt <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non
<b>[9] RÉDUCTION DU TAUX DES REDEVANCES</b>		Uniquement pour les personnes physiques <input type="checkbox"/> Requise pour la première fois pour cette invention (joindre un avis de non-imposition) <input type="checkbox"/> Obtenu antérieurement à ce dépôt pour cette invention (joindre une copie de la décision d'admission à l'assistance gratuite ou indiquer sa référence) : AG <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<b>[10] SÉQUENCES DE NUCLEOTIDES ET/OU D'ACIDES AMINÉS</b>		<input type="checkbox"/> Cochez la case si la description contient une liste de séquences
Le support électronique de données est joint		<input type="checkbox"/>
La déclaration de conformité de la liste de séquences sur support papier avec le support électronique de données est jointe		<input type="checkbox"/>
Si vous avez utilisé l'imprimé «Suite», indiquez le nombre de pages jointes		
<b>[11] SIGNATURE DU DEMANDEUR OU DU MANDATAIRE (Nom et qualité du signataire)</b>		
J. LEHU		<b>VISA DE LA PRÉFECTURE OU DE L'INPI</b> M. MARTIN

**COMBUSTIBLE NUCLEAIRE A FILS TRESSES  
ET SON PROCEDE DE REALISATION**

**DESCRIPTION**

5

**DOMAINE TECHNIQUE**

L'invention concerne un combustible nucléaire à haute densité de matière fissile et son procédé de réalisation.

10

**ETAT DE LA TECHNIQUE ANTERIEURE**

Les performances des réacteurs expérimentaux pour atteindre des flux de neutrons élevés découlent directement des performances des combustibles. Or celles-ci sont limitées par les quantités de matières fissiles pouvant être contenues dans les combustibles, et notamment par leur densité en matière fissile et leur homogénéité qui doivent être les plus élevées possibles ; elles sont également limitées par leur aptitude à pouvoir échanger facilement la chaleur produite au cours de la fission avec le réfrigérant du circuit primaire, et ceci sans atteindre des températures excessives susceptibles d'endommager les combustibles. Enfin, l'évacuation des produits de fission gazeux doit être assurée.

On quantifiera dans ce qui suit la densité de matière fissile en grammes par  $\text{cm}^3$ . Lorsque la matière fissile est de l'uranium, l'unité s'écrit  $\text{gU/cm}^3$ , c'est-à-dire gramme d'uranium par  $\text{cm}^3$ .

Les réacteurs expérimentaux utilisent essentiellement des combustibles à plaques, mais également des combustibles cruciformes.

Les plaques des combustibles à plaques sont fabriquées par colaminage d'un mélange de poudres de matière fissile (uranium, plutonium, americium ou leurs alliages) et d'un métal ductile comme par exemple l'aluminium, le zirconium ou le cuivre. En pratique, ils sont le plus souvent composés d'un alliage d'uranium (par exemple : UAl ou UMo qui sont ductiles,  $U_3Si_2$ , ...) et de poudre d'aluminium entre deux plaques d'aluminium. Lorsque l'alliage n'est pas ductile, comme c'est le cas de  $U_3Si_2$ , il devient nécessaire d'augmenter l'apport de poudre de métal ductile. Ce procédé a fait l'objet de nombreux développements pour augmenter la densité en uranium du combustible (voir le document [1]), ce paramètre étant considéré comme fondamental pour les performances des réacteurs. Toutefois, avec cette méthode, il n'est pas possible de laminer des mélanges ayant plus de 50% en volume d'alliage d'uranium. Par exemple, pour un combustible à plaques fabriqué par colaminage d'un mélange de poudres d'uranium et d'aluminium, il n'est pas possible d'augmenter significativement la charge en matières fissiles puisque le procédé implique que l'uranium soit mélangé avec au minimum 50% en volume de particules d'aluminium pour obtenir la ductilité requise. De plus, l'emploi de l'aluminium limite la température maximale admissible à environ 150°C pour éviter toute corrosion. L'augmentation de la densité d'uranium a donc été réalisée essentiellement en recherchant des alliages

ayant une forte teneur en uranium. Ainsi, les réacteurs ont utilisés successivement des alliages UAl, UO<sub>2</sub>, U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> et maintenant UMo permettant d'espérer atteindre respectivement des densités de 2 gU/cm<sup>3</sup>, 2 gU/cm<sup>3</sup>, 6 5 gU/cm<sup>3</sup> et pour l'UMo 8 gU/cm<sup>3</sup>. Ces valeurs correspondent à des valeurs théoriques dans des conditions idéales, pondérées par un certain coefficient tenant compte des imperfections de réalisation. Pour les trois premiers alliages, assez bien connus des industriels, ces 10 valeurs pondérées correspondent aux valeurs effectivement obtenues. Mais elles en diffèrent pour un alliage plus récent comme l'UMo : la valeur théorique dans des conditions idéales est de 14 à 15 gU/cm<sup>3</sup>, la valeur pondérée par le coefficient tenant compte des 15 imperfections de réalisation connu devrait se situer autour de 8 gU/cm<sup>3</sup>, mais la valeur obtenue en pratique est comprise entre 2 et 2,5 gU/cm<sup>3</sup>.

Les combustibles cruciformes (voir le document [2]) sont quant à eux fabriqués par frittage 20 d'un mélange de poudres d'uranium, d'oxyde d'uranium (UO<sub>2</sub>) et d'autres constituants dont essentiellement le cuivre qui apporte la ductilité requise. L'ensemble est sous forme de poudres, mélangées de manière la plus homogène possible, et ensuite placées à l'intérieur 25 d'un tube en acier inoxydable ductile. Une fois rempli, ce tube est ensuite déformé par passages successifs sur des galets jusqu'à ce qu'il atteigne la forme de croix voulue. Puis il est coupé à la longeur adéquate pour constituer la gaine.

30 Pour les combustibles cruciformes, la forme en croix permet un très bon échange avec le caloporteur

et l'emploi d'acier inoxydable comme gainage rend ces combustibles peu sensibles à une augmentation de la température. Ces combustibles sont donc potentiellement de très bons candidats pour l'augmentation des performances des réacteurs expérimentaux, à condition de pouvoir augmenter leur densité en uranium. Typiquement, ces combustibles sont constitués d'un mélange de poudre d'U, UO<sub>2</sub> et de poudre de cuivre, et leur densité en matière fissile n'est que de 2 gU/cm<sup>3</sup>. En remplaçant la poudre d'UO<sub>2</sub> par de la poudre d'UMo et en augmentant la proportion d'UMo, on pourrait atteindre une densité théorique pondérée de 8 à 10 gU/cm<sup>3</sup>. Mais en pratique, la réalisation du document [2] n'obtient que des valeurs de l'ordre de 2,2 à 2,5 gU/cm<sup>3</sup>. Il semble cependant difficile d'aller au-delà de ces valeurs en utilisant la technologie des poudres.

La présente invention est issue de réflexions concernant l'augmentation de la densité des combustibles destinés aux réacteurs expérimentaux. On a déduit de l'art antérieur que le combustible idéal en termes de performances et de tenue sous irradiation devrait avoir les caractéristiques suivantes :

- une densité (théorique) d'environ 14 à 15 gU/cm<sup>3</sup>,
- des grains d'uranium ou d'alliage d'uranium d'environ 50 à 150 micromètres et entourés d'un matériau d'addition afin d'améliorer la conductibilité thermique et de limiter le gonflement sous irradiation,
- une porosité du combustible de quelques pourcents, uniformément répartie pour évacuer les gaz de fission.

En pratique, les combustibles en plaque ne semblent

guère pouvoir dépasser significativement les 6 gU/cm<sup>3</sup>, et les combustibles cruciformes sont limités à environ un tiers de cette valeur.

## 5 EXPOSÉ DE L'INVENTION

Le but de l'invention est de fournir un combustible nucléaire de forte densité de matière fissile, possédant en outre un bon comportement sous irradiation et une bonne évacuation des produits de fission gazeux. Par « bon comportement sous irradiation », on entend notamment une bonne stabilité dimensionnelle et un bon transfert thermique.

Ce but est atteint par un combustible nucléaire à densité élevée de matière fissile, caractérisé en ce qu'il se présente sous la forme d'un assemblage de fils élémentaires, dont la majeure partie est constituée de matière fissile, lesdits fils étant assemblés par toronage, tressage ou tissage et ledit assemblage étant contenu dans une enveloppe inoxydable et ductile, ces fils élémentaires étant comprimés, par déformation de ladite enveloppe, et les fils élémentaires de matière fissile étant suffisamment fins pour permettre l'accommodation dimensionnelle du combustible aux effets de l'irradiation lors de la combustion nucléaire et l'évacuation des produits de fission gazeux.

Avantageusement, la déformation de l'enveloppe est réalisée jusqu'à ce que les espaces libres entre les fils élémentaires n'occupent que 3 à 30 15% de la section interne de l'enveloppe après déformation.

En d'autres termes, les caractéristiques de forte densité de matière fissile, de bon comportement sous irradiation et de bonne évacuation des produits de fission gazeux sont obtenues en façonnant le matériau fissile en fils élémentaires fins, ces fils étant éventuellement associés à des fils élémentaires en un autre métal améliorant la ductilité ou le comportement sous irradiation, l'ensemble de ces fils élémentaires étant assemblé par tressage ou toronnage, et entouré d'une enveloppe en métal ductile inoxydable (jouant le rôle de gaine) qui a été déformée de manière à ce que les fibres élémentaires soient tassées et légèrement déformées, et ne conservent entre elles qu'une faible quantité d'espace libre. Les éléments ainsi réalisés sont des éléments de combustible nucléaire, appelés « crayons » lorsque l'enveloppe en métal ductile est un tube. L'invention visant à augmenter la densité du combustible en matière fissile, la majorité des fils élémentaires est en matière fissile.

Notons que le diamètre des fils élémentaires et leur tassement dans la gaine ductile inoxydable sont choisis de manière à ce que le combustible s'accorde bien des effets de l'irradiation lors de la combustion nucléaire, et à ce que les produits de fission gazeux s'évacuent aisément.

Selon un mode de réalisation particulier, la déformation de l'enveloppe est réalisée de sorte que la section des fils élémentaires soit déformée, et que les sections de deux fibres successives s'adaptent l'une à l'autre.

Avantageusement, la matière fissile est choisie parmi le groupe comprenant l'uranium, le plutonium, l'américium, leurs alliages ou une association de plusieurs de ces éléments.

5 Avantageusement, lesdits alliages sont choisis parmi le groupé comprenant UMo et UAl.

De préférence, la matière fissile est un alliage d'UMo comportant autour de 8% en masse de molybdène.

10 On note que le métal ductile et inoxydable de l'enveloppe est préférentiellemnt de l'acier inoxydable 316 L ou 316 LN.

15 Des alliages comme  $UO_2$  ou  $U_3Si_2$ , couramment utilisés sous forme de poudres, ne sont pas utilisables pour réaliser l'invention en raison de leur manque de ductilité qui interdit la réalisation de fils.

Préférentiellement, les fils élémentaires ont un diamètre compris entre  $10\mu m$  et  $100\mu m$ , leur section initiale étant circulaire. Toutefois ils sont tassés par rétrécissement du volume intérieur de la gaine (laminage, galetage) après remplissage par l'assemblage « tressé ». Ce tassement est prévu pour optimiser la densité de combustible, mais aussi favoriser les transferts thermiques, l'accomodation dimensionnelle sous irradiation et l'évacuation des produits de fission gazeux. Ce tassement produit un léger écrasement des fibres, rendant leur section légèrement polygonale, ce qui améliore significativement les transferts thermiques. Plus précisément, on entend par légèrement polygonale le fait que deux surface convexes pressées l'une contre

l'autre présentent localement des déformations tendant à les aplanir et à les adapter précisément l'une à l'autre. On peut quantifier ce tassement par le pourcentage de vide existant dans une section transversale, qui est de l'ordre de 3 à 15%, et préférentiellement voisin de 10%.

Selon un mode de réalisation particulier, l'assemblage de fils élémentaires est composé uniquement de fils de même composition.

10 Selon un autre mode de réalisation, l'assemblage de fils élémentaires est composé de fils de compositions différentes.

15 En d'autres termes, les fils élémentaires peuvent être tous composés de matière fissile, mais ils peuvent également être associés à des fils élémentaires en un autre métal améliorant la ductilité ou le comportement sous irradiation du combustible nucléaire.

De façon préférentielle, l'assemblage de fils élémentaires comporte entre 60% et 90% en volume  
20 de fils d'UMo, de 3 à 15% d'espaces vides et le reste en fils d'autres matériaux. En d'autres termes, selon  
une section transversale, de 60% à 90% de la surface intérieure de l'enveloppe est occupé par des fils d'alliage UMo, de 3 à 15% par des espaces vides et le  
25 reste en fils d'autres matériaux. Dans le cas particulier où ce pourcentage atteint 90%, et où les espaces vides représentent 10% de la section, la totalité des fils utilisés est réalisée en UMo.

30 Selon un premier cas particulier, les fils ont des diamètres identiques.

Selon un deuxième cas particulier, les fils ont des diamètres différents.

Avantageusement, l'assemblage de fils élémentaires a la forme d'une tresse.

5 Selon une variante, l'assemblage de fils élémentaires a la forme d'un toron. Avantageusement, le toron est un toron composé dépourvu de toron central.

10 Selon une variante, l'assemblage de fils élémentaires est tissé.

15 L'intérêt de façonner ces métaux en fils est de pouvoir bénéficier des avantages du métal en général (densité, conductibilité thermique, facilité de mise en forme...) sans avoir les inconvénients du métal à l'état massif sous forme de pastilles ou de barreaux (gonflement sous irradiation...). On sait en effet que le gonflement sous irradiation des alliages d'uranium est notamment lié à l'impossibilité pour les gaz de fission de migrer vers l'épaisseur de la pastille ou du barreau alors que dans une conception à fils, si ceux-ci sont suffisamment fins, les produits de fissions peuvent atteindre la surface des fils et migrer dans l'espace entre fils qui autorise une évacuation plus directe et plus rapide que dans un matériau poreux. On évite également les inconvénients des poudres ou objets fabriqués à partir de poudres : nécessité d'une certaine ductilité nécessitant des ajouts importants de matière non fissile, manque d'homogénéité finale.

20 25 30 L'existence d'un grand nombre de fils élémentaires facilite la réalisation d'assemblages réguliers et fonctionnellement homogènes de divers composants (combustibles mixtes) ou de modifier les

propriétés du combustible lui-même en ajoutant dans l'assemblage des fils de métaux d'addition améliorant la ductilité ou le comportement sous irradiation. On a ainsi la possibilité de mélanger de façon organisée et 5 maîtrisée des fils de natures différentes, dès lors qu'ils sont dans un état métallurgique qui permet la mise en œuvre d'un assemblage dit « tressé », qui désignera dans ce qui suit aussi bien un assemblage tressé au sens propre qu'un assemblage obtenu par 10 toronnage simple ou composé.

Lorsque l'assemblage est obtenu par toronage, il est avantageux de ne pas placer de toron central selon la ligne neutre de l'assemblage pour conserver l'homogénéité de cet assemblage et faciliter 15 son accommodation dimensionnelle aux effets de l'irradiation lors de la combustion nucléaire.

Un autre avantage de l'invention réside dans la forme continue des espaces vides, en microcanaux entre les fibres élémentaires, qui favorise 20 l'évacuation rapide des produits de fission gazeux.

---

Selon l'art antérieur, la porosité permettait une certaine évacuation, mais la communication des micro espaces vides successifs était beaucoup plus aléatoire et moins directe. Cette évacuation est encore facilitée 25 lorsqu'il ny a pas de toron central.

La présente invention couvre également toute assemblage de crayons de combustible nucléaire décrits précédemment.

Un autre objet de l'invention réside dans le procédé de réalisation du combustible nucléaire décrit ci-dessus. Ce procédé comporte les étapes suivantes :

- 5 - réalisation de fils élémentaires (6) de composition déterminée, dont la majeure partie sont des fils de matière fissile,
- réalisation d'au moins un assemblage (1) à l'aide desdits fils,
- 10 - placement de l'assemblage (1) dans une enveloppe (2) inoxydable et ductile,
- mise en forme dudit tube rempli.

De manière préférentielle, les étapes du procédé sont les suivantes :

- 15 a) façonnage du matériau fissile en fils fins et régulier,
- b) de manière facultative, façonnage de fils en un ou plusieurs autres matériaux améliorant la ductilité ou les caractéristiques sous irradiation du combustible final,
- 20 c) dans le cas où l'étape b) existe, réalisation du mélange homogène des fils issus de cette étape b) aux fils de matériau fissile issus de l'étape a)
- d) assemblage des fils
- 25 e) insertion d'un ou plusieurs assemblages issu de l'étape d) dans une enveloppe en métal inoxydable et ductile, en préservant l'homogénéité et la régularité de l'assemblage
- f) mise en forme de l'enveloppe.

30 De préférence, la mise en forme de l'enveloppe ductile inoxydable est faite de manière à

produire un léger écrasement des fibres et à ne laisser comme espace vide que 3% à 15% de la section traversale délimitée par la surface intérieure de l'enveloppe.

On peut si besoin effectuer le  
5 sectionnement de l'enveloppe remplie à la longueur requise pour chaque installation nucléaire utilisatrice du combustible, et le cas échéant l'insérer dans une seconde enveloppe requise par cette installation nucléaire.

10 Selon un mode de réalisation particulier,  
l'enveloppe est un tube, il n'y a qu'un seul assemblage dans l'enveloppe et la mise en forme s'effectue par étirage à travers une filière ou par laminage.

15 Selon un autre mode de réalisation,  
l'enveloppe est un tube et la mise en forme s'effectue par galetage.

Avantageusement, l'enveloppe est aplatie et  
contient plusieurs assemblages placés parallèlement les  
uns contre les autres de manière homogène, et la mise  
20 en forme de cette enveloppe ainsi remplie s'effectue  
par pressage ou laminage.

---

Tout procédé d'élaboration des fils convient pour la mise en œuvre de l'invention,  
25 notamment ceux qui permettent d'obtenir des fils homogènes de 10 à 100 µm avec les métaux déjà spécifiés. Nous avons utilisé le procédé du plateau tournant (voir le document [3]) optimisé pour les caractéristiques physiques propres à l'alliage utilisé.  
30 Ce procédé est basé sur la projection sur un disque tournant d'un jet d'alliage fondu. Par ce procédé, les

fils ont un diamètre et une composition chimique contrôlée. Son application à la réalisation de fils d'UMo sera détaillée dans l'exposé des modes de réalisation de l'invention.

5 Le mélangeage, le toronage, simple ou composé, ainsi que le tressage sont suffisamment connus de l'homme du métier pour ne pas être davantage décrits ici.

10 Si l'enveloppe ductile inoxydable est un tube, l'insertion de l'assemblage « tressé » dans le tube inoxydable et ductile s'effectue à l'aide d'un autre fil, de traction, plus robuste, préalablement introduit, et on fixe l'assemblage, par exemple par un crochet ou par soudure. Après fixation, de l'assemblage à ce fil de tirage, celui-ci est tiré de manière à faire rentrer l'assemblage dans le tube.

15 Si l'enveloppe est plane, il convient d'y disposer plusieurs assemblages successifs, tous parallèles entre eux et rangées régulièrement les uns contre les autres, de manière la plus homogène possible. Puis la déformation mécanique est appliquée par tous moyens, en veillant à ne pas modifier l'arrangement des assemblages successifs. Ces 20 assemblages peuvent être rangés selon une ou plusieurs couches, du moment que l'homogénéité est conservée et que le combustible final respecte les contraintes de déformation et d'évacuation des produits de fission gazeux.

30 Lorsque l'enveloppe ductile inoxydable est un tube, sa déformation mécanique après remplissage

s'effectue soit par étirage à travers une filière à faible température (moins de 100°C) ou même à froid, selon l'épaisseur de ce tube. Mais la mise en forme préférentielle s'effectue par galettage, par passes 5 successives, aboutissant à un combustible en crayons de section cruciforme. Cette mise en forme est détaillée plus amplement dans l'exposé des modes de réalisation de l'invention.

Lorsque l'enveloppe ductile inoxydable est 10 de forme aplatie, sa déformation mécanique peut s'effectuer par pressage ou laminage. On peut ainsi envisager de retrouver une forme de combustible en plaques.

Les étapes de sectionnement et 15 éventuellement de finitions spécifiques à chaque installation nucléaire utilisatrice sont connues de l'homme du métier et ne sont pas détaillées ici.

Pour conclure, il convient de mentionner les possibilités d'optimisation offertes par le 20 procédé pour l'adapter aux différentes compositions possibles du matériau fissile et des éventuels éléments destinées à l'amélioration des transferts thermiques ou du comportement sous irradiation. Les diamètres des fils élémentaires peuvent être ajustés, le « tissage » 25 peut présenter de nombreuses variantes, et le tassement des fils peut revêtir plusieurs modalités, avec divers pourcentages d'espaces vides.

#### BRÈVE DESCRIPTION DES DESSINS

30 L'invention sera mieux comprise et d'autres avantages et particularités apparaîtront à la lecture

de la description qui va suivre, donnée à titre d'exemple non limitatif, accompagnée des dessins annexés parmi lesquels :

- la figure 1 représente une vue de côté d'une tresse selon l'invention montée dans une gaine,
- 5 - la figure 2 est une coupe selon l'axe XX de la figure 1,
- la figure 3 représente une vue en coupe selon l'axe XX de l'ensemble tresse et gaine lors de son passage sur un train de galets,
- 10 - la figure 4 représente une vue en coupe selon l'axe XX de l'ensemble tresse et gaine après sa mise en forme par galetage.

#### **15 EXPOSÉ DÉTAILLÉ DE MODES DE RÉALISATION PARTICULIERS**

On peut réaliser des fils d'UMo et les tresser tous ensemble. On peut également mélanger les fils d'UMo avec d'autres fils. Par exemple, si l'on veut améliorer la conductibilité du matériau, on peut mélanger les fils d'UMo avec des fils de cuivre. De même, si l'on désire diluer la charge en uranium du combustible, on tressera les fils d'UMo avec des fils de carbone et/ou de zirconium.

A titre d'exemple, on va réaliser une tresse combustible réalisée avec un fil uranifère d'UMo très homogène et des fils de cuivre en proportion décroissante, puis exclusivement avec des fils d'UMo.

Compte tenu des contraintes de sécurité liées à la mise en œuvre d'UMo, les premiers essais ont été réalisés à l'aide d'acier 304 dont les caractéristiques métallurgiques sont reconnues comme

équivalentes. La réalisation en UMo, actuellement en cours, confirme cette équivalence. Pour ne pas alourdir la description ci-après, on ne mentionnera que l'UMo.

Tout d'abord, on commence par élaborer un fil d'UMo, dont le diamètre est compris entre 10 µm et 100 µm. L'élaboration des fils d'UMo peut être obtenue par le procédé du plateau tournant (voir le document [3]) optimisé pour les caractéristiques physiques propres à cet alliage. Ce procédé est basé sur la projection sur un disque tournant d'un jet d'alliage fondu. Par ce procédé, les fils ont un diamètre et une composition chimique contrôlée.

Pour préparer le fil d'alliage UMo, par exemple un alliage d'uranium à 8 % en poids de molybdène, l'uranium et l'élément d'alliage sont pesés et placés dans un creuset chauffé par un générateur haute fréquence. Lorsque la température est suffisamment élevée, on met la masse fluide de l'alliage UMo sous la forme d'un jet en fusion et on met en contact ce jet avec un fluide de trempe animé d'un mouvement de rotation centrifuge. La fusion est réalisée sous atmosphère de gaz inerte et le jet de métal ou d'alliage en fusion est entouré par une enveloppe de gaz inerte. Le gaz inerte peut être choisi parmi l'argon, l'azote, l'hélium et aura une pression comprise entre 1 et 15 bars. Le jet de métal ou d'alliage en fusion gainé par ce gaz passe par l'orifice de l'enveloppe entourant le creuset, et le jet de métal ou d'alliage en fusion, toujours gainé de la sorte d'une enveloppe de gaz inerte, poursuit sa trajectoire généralement rectiligne jusqu'à ce qu'il

heurte le rideau de fluide de trempe, par exemple de l'eau en mouvement centrifuge rapide. La vitesse linéaire du fluide de trempe (ici l'eau) au point de contact peut être comprise entre 10 et 60 m/sec. Dans 5 l'exemple présent, elle est de 40 m/sec. Au point de contact, l'enveloppe de gaz inerté entourant le jet de métal ou d'alliage en fusion est dévié, tandis que seul le jet de métal ou d'alliage en fusion pénètre dans la masse d'eau et est atomisé et trempé rapidement, de 10 préférence, à la vitesse déjà indiquée plus haut.

De la même manière, on élabore 200 à 400 fils de 0,15 mm de diamètre, assemblés ensuite en un seul toron composé. Par exemple, cet assemblage comporte 216 fils élémentaires toronnés en 9 torons simples (ou fuseaux), qui sont à nouveau toronnés entre eux sans toron central. Des expérimentations ont été réalisées notamment avec des pourcentages décroissants de fils de cuivre, puis avec la totalité des fils élémentaires en UMo.

20 Lorsque des fils de cuivre sont ajoutés, on réalise le mélange des composants. Pour cela, on réalise mécaniquement une tresse à partir du fil uranifère et des autres fils d'addition : on obtient une tresse mixte UX + Y avec X=Mo et Y=Cu.

25 Pour réaliser la tresse, on peut utiliser la méthode classique consistant à bobiner et à tisser les fils à partir de plusieurs bobines en fonction de la forme qu'on souhaite donner à la tresse. On peut aussi par exemple torsader les fils tous ensemble dans 30 le même sens. La tresse obtenue a un diamètre compris entre 2 mm et 10 mm pour être introduite dans un tube

de 5 mm de diamètre extérieur et d'épaisseur 0,15 mm. Sa densité est de l'ordre de 50%, c'est à dire que selon une section transversale de cette tresse, 50% de la surface de cette section serait constituée de fils, 5 le reste d'espaces vides, ce qui permet son introduction sans difficultés dans un tube de plus petit diamètre.

Par ailleurs, on fabrique un tube ductile et inoxydable de section circulaire qui va servir à confiner la tresse : le tube va jouer le rôle de gaine. Il sera préférentiellement réalisé en inox 316 L ou 316 LN.

Puis on effectue le montage de la tresse 1 dans sa gaine 2 (voir figure 1) par tirage. On voit sur 15 la figure 2 qu'entre la tresse 1 et la gaine 2 est schématisé un jeu 3 nécessaire pour que la tresse puisse passer dans la gaine. En pratique, le diamètre du fil est plus grand que celui du tube, mais ce fil, peu dense (50% de fibres, 50% d'espaces vides), est 20 facilement compressible : le jeu 3 schématise cette compressibilité.

Enfin, on effectue la déformation mécanique, à faible température (inférieure à 100°C) ou à froid. Si l'on veut obtenir un combustible de forme cruciforme, cette déformation peut être assurée par passages successifs sur un train de galets 4 dont le profil est étudié pour atteindre la forme de croix souhaitée (voir figure 3). C'est ce qu'on appelle le galetage ou le co-galetage. On obtient ainsi un élément 30 combustible 5 en « crayon » ayant une section cruciforme (voir figure 4).

On remarque que le jeu 3 se trouvant entre la tresse 1 et la gaine 2 est fonction de la déformation imposée à la gaine. Pour réaliser la mise en forme, on effectue des passages successifs du crayon combustible sur un train à galets à une température modérée. Une fois la déformation terminée, ledit jeu est nul et la tresse a une densité théorique comprise entre 80% et 90%, compte tenu des 10% de la surface d'une section occupée par les espaces vides, la densité théorique de 90% correspond au cas où la totalité des fils élémentaires est en UMo.

On notera que l'intensité de l'écrasement du crayon combustible lors de sa mise en forme est soigneusement dosé de manière à ce qu'il reste de légers espaces libres entre les différents fils de la tresse afin que les sous-produits de fission gazeux puissent être évacués. Dans ce but, on pourra par exemple faire en sorte que les fils, initialement de section cylindrique, soient déformés par compression et que les surfaces en contact de deux fils successifs se déforment en s'adaptant l'une à l'autre. De façon préférentielle, cette déformation est poursuivie jusqu'à l'obtention pour la majorité des fils d'une section quasi-polygonale, les parties sans contact avec un autre fil n'acquérant évidemment pas cette surface polygonale. Il produit un léger écrasement des fibres, rendant leur section légèrement polygonale, ce qui améliore significativement les transferts thermiques. Plus précisément, on entend par légèrement polygonale le fait que deux surfaces convexes pressées l'une contre l'autre présentent localement des déformations tendant

à les aplانir et à les adapter précisément l'une à l'autre.

La mise en forme du crayon combustible peut également être obtenue par étirage de l'ensemble « crayon combustible » au travers d'une filière de forme appropriée, le principe reposant sur l'hypothèse que les matériaux (gaine + tresse) traverse la filière sans glisser l'un par rapport à l'autre. On pourra ainsi réaliser selon l'invention des combustibles nucléaires cruciformes destinés à l'obtention de combustibles à forte densité en uranium (densité supérieure à 2 gU/cm<sup>3</sup>). Dans ce cas, on utilisera plutôt le procédé de mise en forme classique de laminage à galets. On pourra également réaliser des combustibles de forme cylindrique destinés à l'obtention de combustibles dont la densité en uranium est supérieure à 10gU/cm<sup>3</sup>. Dans ce cas, le procédé de mise en forme utilisé sera préférentiellement l'étirage, mais un laminage avec une forme appropriée peut aussi convenir.

## BIBLIOGRAPHIE

5 [1] « Design of high density gamma-phase uranium, alloys for leu dispersion fuel applications », G. L. HOFMAN, M. K. MEYER, A. E. RAY, (1998).

10 [2] « Boron poisoning experiments at the PIK mock-up », livret publié par l'Académie des Sciences Russe, Institut de Physique Nucléaire de St Pétersbourg, preprint 2426, 2001.

15 [3] « Procédé de préparation de particules de métal ou d'alliage de métal nucléaire », demande de brevet FR-A-2 814 097 du 21/09/2000.

## REVENDICATIONS

1. Combustible nucléaire à densité élevée de matière fissile, caractérisé en ce qu'il se présente 5 sous la forme d'un assemblage (1) de fils élémentaires, dont la majeure partie est constituée de matière fissile, lesdits fils étant assemblés par toronage, tressage ou tissage et ledit assemblage étant contenu dans un enveloppe inoxydable et ductile, ces fils élémentaires étant comprimés par déformation de ladite enveloppe, et les fils élémentaires de matière fissile 10 étant suffisamment fins pour permettre l'accommodation dimensionnelle du combustible aux effets de l'irradiation lors de la combustion nucléaire et 15 l'évacuation des produits de fission gazeux.
2. Combustible nucléaire selon la revendication précédente, caractérisé en ce que la déformation de l'enveloppe est réalisée jusqu'à ce que 20 les espaces libres entre les fils élémentaires n'occupent que 3 à 15% de la section interne de l'enveloppe après déformation.
3. Combustible nucléaire selon l'une 25 quelconque des revendications 1 ou 2, caractérisé en ce que la déformation de l'enveloppe est réalisée de sorte que la section des fils élémentaires soit déformée, et que les sections de deux fibres successives s'adaptent l'une à l'autre.

4. Combustible nucléaire selon l'une quelconque des revendications 1, 2 ou 3, caractérisé en ce que la matière fissile est choisie parmi le groupe comprenant l'uranium, le plutonium, l'américium, leurs 5 alliages ou une association de plusieurs de ces éléments.

5. Combustible nucléaire selon la revendication précédente, caractérisé en ce que lesdits 10 alliages sont choisis parmi le groupe comprenant UMo et UAl.

6. Combustible nucléaire selon l'une quelconque des revendications 4 ou 5, caractérisé en ce 15 que la matière fissile est un alliage d'UMo comportant autour de 8% en masse de molybdène.

7. Combustible nucléaire selon la revendication 1, caractérisé en ce que les fils 20 élémentaires ont un diamètre compris entre 10 $\mu\text{m}$  et 100 $\mu\text{m}$ .

8. Combustible nucléaire selon la revendication 1, caractérisé en ce que l'assemblage de 25 fils élémentaires (6) est composé uniquement de fils de même composition.

9. Combustible nucléaire selon la revendication 1, caractérisé en ce que l'assemblage de 30 fils élémentaires (6) est composé de fils de compositions différentes.

10. Combustible nucléaire selon l'une quelconque des revendications 8 ou 9, caractérisé en ce que les fils (6) ont des diamètres identiques.

5

11. Combustible nucléaire selon l'une quelconque des revendications 8 ou 9, caractérisé en ce que les fils (6) ont des diamètres différents.

10

12. Combustible nucléaire selon l'une quelconque des revendications 8 ou 9, caractérisé en ce que l'assemblage (1) de fils élémentaires a la forme d'une tresse.

15

13. Combustible nucléaire selon l'une quelconque des revendications 8 ou 9, caractérisé en ce que l'assemblage (1) de fils élémentaires a la forme d'un toron.

20

14. Combustible nucléaire selon la revendication précédente, caractérisé en ce que le toron est un toron composé dépourvu de toron central.

25

15. Combustible nucléaire selon l'une quelconque des revendications 8 ou 9, caractérisé en ce que l'assemblage (1) de fils élémentaires est tissé.

30

16. Procédé de réalisation d'un combustible nucléaire selon l'une quelconque des revendications 1 à 15, ledit procédé comprenant les étapes suivantes :

- réalisation de fils élémentaires (6) de composition déterminée, dont la majeure partie sont des fils de matière fissile,
- réalisation d'au moins un assemblage (1) à l'aide desdits fils,
- placement de l'assemblage (1) dans une enveloppe (2) inoxydable et ductile,
- mise en forme de ladite enveloppe remplie.

10                   17. Procédé de réalisation d'un combustible nucléaire selon la revendication 16, dans lequel l'enveloppe est un tube, il n'y a qu'un seul assemblage et la mise en forme s'effectue par étirage à travers une filière ou par laminage.

15                   18. Procédé de réalisation d'un combustible nucléaire conforme à la revendication 16, dans lequel l'enveloppe est un tube et la mise en forme s'effectue par galetage.

20                   19. Procédé selon la revendication précédente, caractérisé en ce que l'enveloppe est aplatie et contient plusieurs assemblages placés parallèlement les uns contre les autres de manière homogène, et la mise en forme de cette enveloppe ainsi remplie s'effectue par pressage ou laminage.

- réalisation de fils élémentaires (6) de composition déterminée, dont la majeure partie sont des fils de matière fissile,
- réalisation d'au moins un assemblage (1) à l'aide desdits fils,
- placement de l'assemblage (1) dans une enveloppe (2) inoxydable et ductile,
- mise en forme de ladite enveloppe remplie.

10

**17.** Procédé de réalisation d'un combustible nucléaire selon la revendication 16, dans lequel l'enveloppe est un tube, il n'y a qu'un seul assemblage et la mise en forme s'effectue par étirage à travers une filière ou par laminage.

15

**18.** Procédé de réalisation d'un combustible nucléaire conforme à la revendication 16, dans lequel l'enveloppe est un tube et la mise en forme s'effectue par galetage.

20

---

**19.** Procédé selon la revendication 16, caractérisé en ce que l'enveloppe est aplatie et contient plusieurs assemblages placés parallèlement les uns contre les autres de manière homogène, et la mise en forme de cette enveloppe ainsi remplie s'effectue par pressage ou laminage.

25

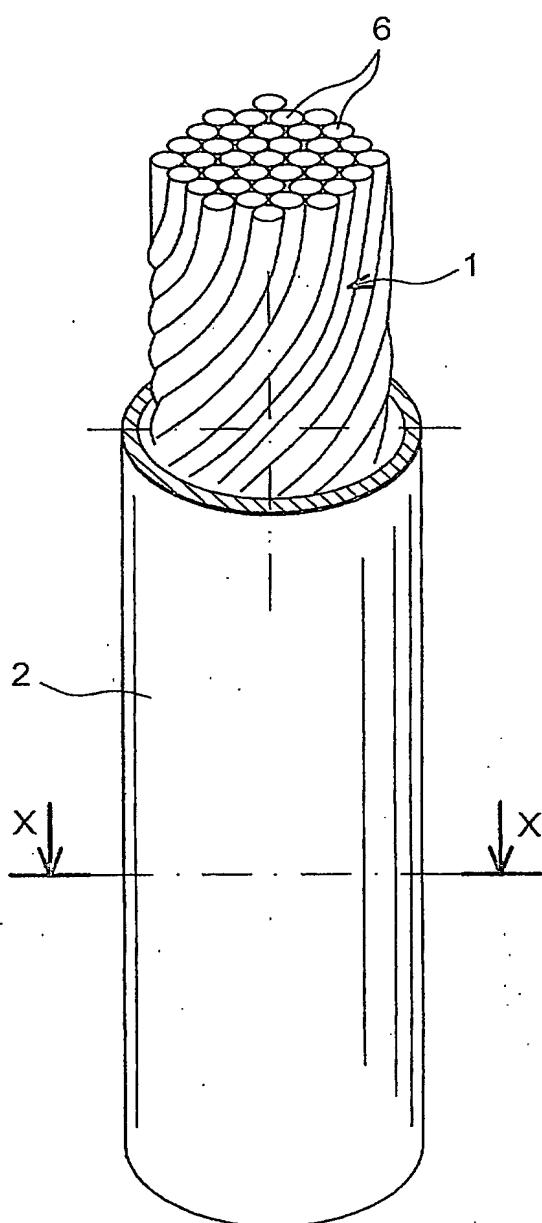


FIG. 1

FIG. 2

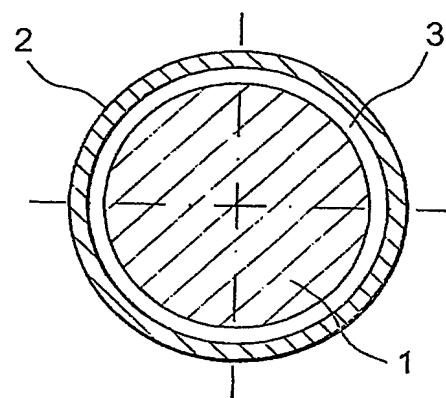


FIG. 3

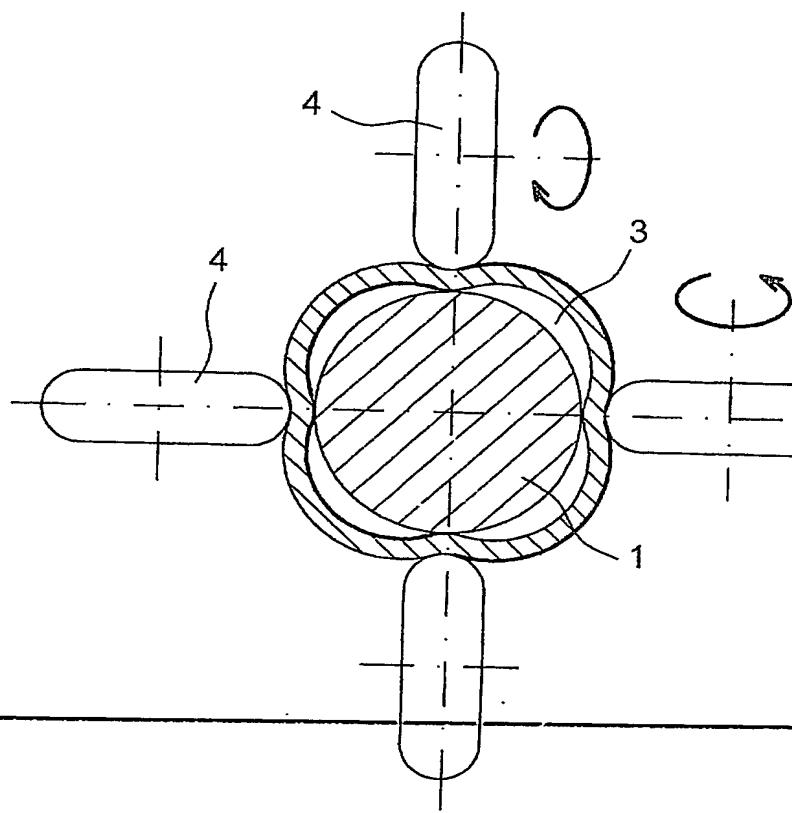
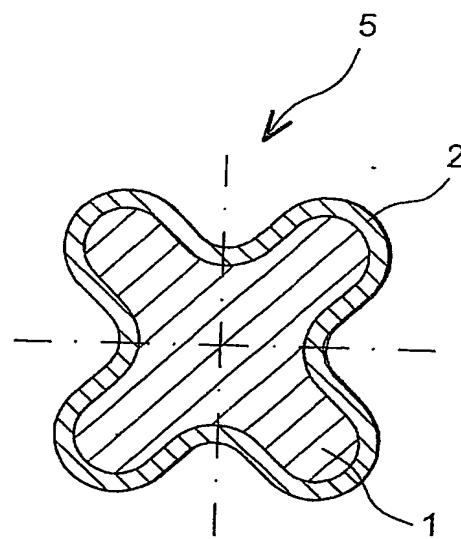


FIG. 4





## DÉPARTEMENT DES BREVETS

26 bis, rue de Saint Pétersbourg  
75800 Paris Cedex 08  
Téléphone : 33 (1) 53 04 53 04 Télécopie : 33 (1) 42 94 86 54

# BREVET D'INVENTION

## CERTIFICAT D'UTILITÉ

Code de la propriété intellectuelle - Livre VI

N° 11235\*03

## DÉSIGNATION D'INVENTEUR(S) Page N° 1.../1...

(À fournir dans le cas où les demandeurs et les inventeurs ne sont pas les mêmes personnes)

Cet imprimé est à remplir lisiblement à l'encre noire

DB 113 @ W / 270601

Vos références pour ce dossier (facultatif)	B 14331.3/D bd1450
N° D'ENREGISTREMENT NATIONAL	03.04434 DU 09.04.2003

## TITRE DE L'INVENTION (200 caractères ou espaces maximum)

COMBUSTIBLE NUCLEAIRE A FILS TRESSÉS ET SON PROCÉDÉ DE RÉALISATION.

## LE(S) DEMANDEUR(S) :

COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE  
31-33 rue de la Fédération  
75752 PARIS 15 ème.

## DESIGNE(NT) EN TANT QU'INVENTEUR(S) :

<input checked="" type="checkbox"/> Nom	BALLAGNY	
Prénoms	Alain	
Adresse	Rue	21 rue de Roussigny
	Code postal et ville	19114710 LES MOLIERES
Société d'appartenance (facultatif)		
<input checked="" type="checkbox"/> Nom	LLORCA	
Prénoms	Nuria	
Adresse	Rue	27 Avenue de l'Obélisque
	Code postal et ville	191171710 SAINT VRAIN
Société d'appartenance (facultatif)		
<input checked="" type="checkbox"/> Nom		
Prénoms		
Adresse	Rue	
	Code postal et ville	11111
Société d'appartenance (facultatif)		

S'il y a plus de trois inventeurs, utilisez plusieurs formulaires. Indiquez en haut à droite le N° de la page suivi du nombre de pages.

## DATE ET SIGNATURE(S)

## DU (DES) DEMANDEUR(S)

## OU DU MANDATAIRE

(Nom et qualité du signataire)

PARIS LE 16 Septembre 2003:

J. LEHU

PCT/FR2004/050148



**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning  
Operations and is not part of the Official Record**

## **BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- BLACK BORDERS**
- IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES**
- FADED TEXT OR DRAWING**
- BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING**
- SKEWED/SLANTED IMAGES**
- COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS**
- GRAY SCALE DOCUMENTS**
- LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT**
- REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY**
- OTHER:** \_\_\_\_\_

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.**